

# Vysoce pevnostní oceli

Definování pojmu vysoce pevnostní oceli, základní rozdělení pevnostních ocelí. Pojem zjemnění zrna (mikrolegující prvky, proces vzniku a růstu zrn). Zásady zpracování (řízené válcování, zrychlené ochlazování, přímé kalení, termomechanické zpracování apod.). Způsoby normalizace (chemické složení, vlastnosti). Způsoby kalení a popouštění (chemické složení, vlastnosti).

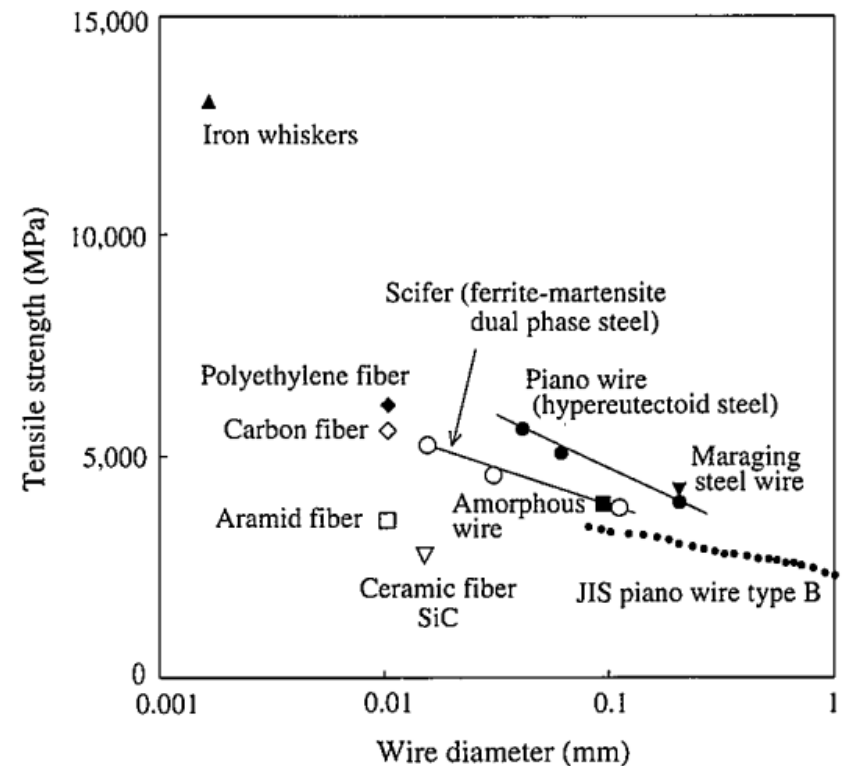
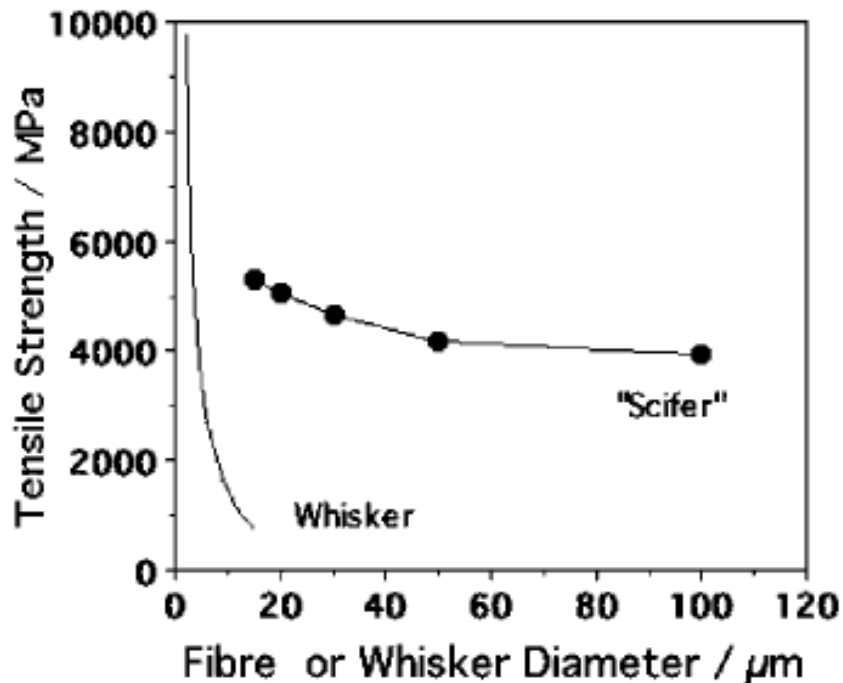


***doc. Ing. Jaromír MORAVEC, Ph.D.***

# Pevnostní limity různých materiálů

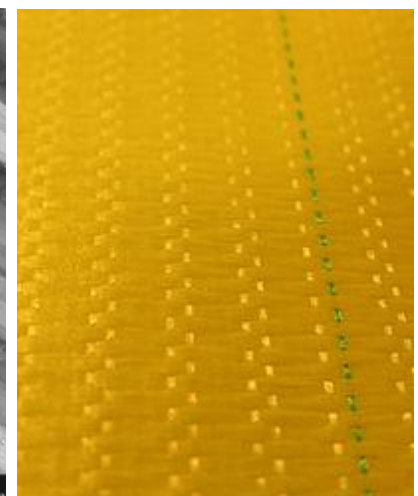
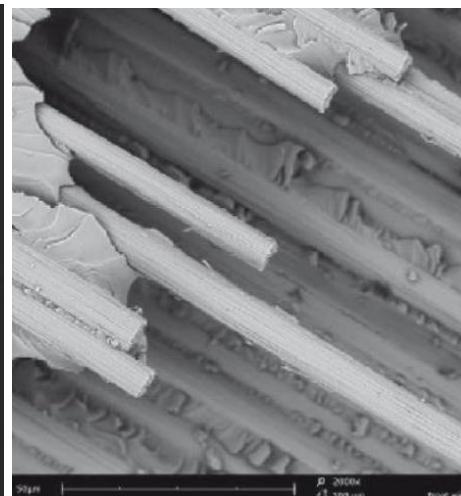
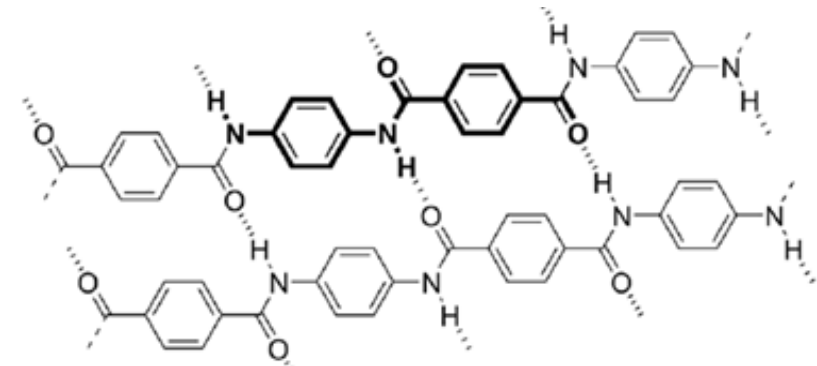
Teoretická pevnost ideálního krystalu železa vycházející z pevnosti vazeb atomů je 21 GPa, tj. 21 000 MPa.

- Již v roce 1956 byl vytvořen tzv. **whisker**, což je monokrystalické vlákno s vysokým poměrem délky k tloušťce. Jeho maximální **pevnost byla 13 GPa**.
- Prof. Bhadeshia z Cambridge university vytvořil materiál ve formě drátu nazvaný **Scifer**. Jde o drát vyrobený z oceli s obsahem 0,2 %C; 0,8%Si a 1%Mn se strukturou martenzitu a feritu. Má mez pevnosti v tahu 5,5 GPa a přitom je velmi tvárný. Je k tomu potřebný vysoký stupeň deformace (9). Polotovarem pro výrobu je drát o průměru 10 mm. Konečným průměrem je pak vlákno o průměru 8  $\mu\text{m}$ .



# Pevnostní limity různých materiálů

- **Hedvábné vlákno** – má pevnost až 600 MPa. Vlákna jsou velmi tenká (10  $\mu\text{m}$ ) a dlouhá (kokon je tvořen jediným vláknem dlouhým stovky metrů).
- **Uhlíkové vlákno** – pro konstrukční využití je známo již cca 50 let. Tloušťka vláken 5 – 10  $\mu\text{m}$ , hustota 1,75  $\text{kg}\cdot\text{dm}^3$ , mez pevnosti 3,5 – 7 GPa.
- **Aramidové vlákno** (aromatický polyamid) – známý také jako Kevlar, nebo Twaron. Hustota 1,44  $\text{kg}\cdot\text{dm}^3$ , mez pevnosti 3,5 – 7 GPa.
- **Polyethylenové vlákno** - Hustota 0,97  $\text{kg}\cdot\text{dm}^3$ , mez pevnosti 3,5 GPa.
- **Uhlíkové nanotrubičky** – prvně vyrobeny v roce 1991. Hustota 0,116  $\text{kg}\cdot\text{dm}^3$ , pevnost v tahu 6,9 GPa. Teoretická pevnost až 130 GPa.



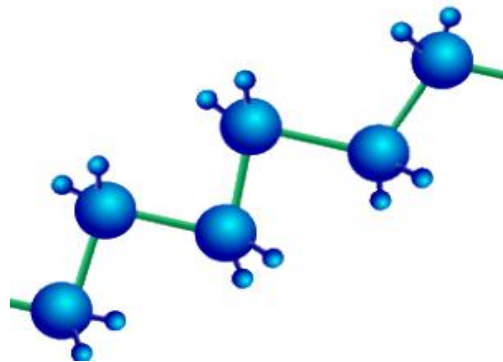
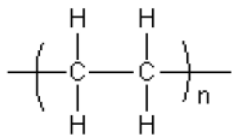
**Hedvábné vlákno**

**Uhlíkové vlákno**

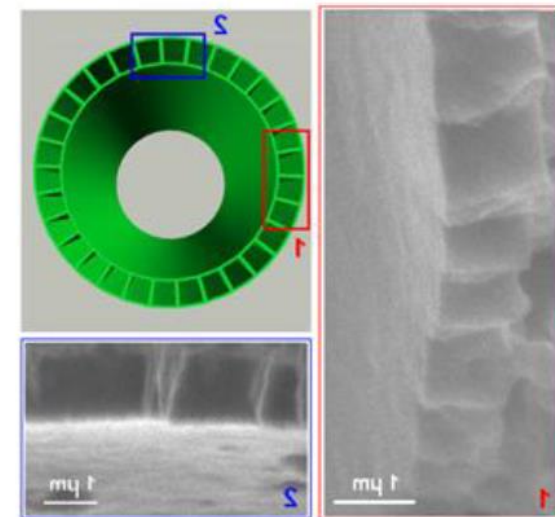
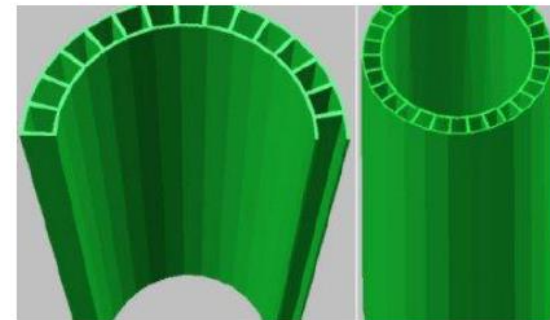
**Aramidové vlákno**

# Pevnostní limity různých materiálů

- **Hedvábné vlákno** – má pevnost až 600 MPa. Vlákna jsou velmi tenká (10  $\mu\text{m}$ ) a dlouhá (kokon je tvořen jediným vláknem dlouhým stovky metrů).
- **Uhlíkové vlákno** – pro konstrukční využití je známo již cca 50 let. Tloušťka vláken 5 – 10  $\mu\text{m}$ , hustota 1,75  $\text{kg}\cdot\text{dm}^3$ , mez pevnosti 3,5 – 7 GPa.
- **Aramidové vlákno** (aromatický polyamid) – známý také jako Kevlar, nebo Twaron. Hustota 1,44  $\text{kg}\cdot\text{dm}^3$ , mez pevnosti 3,5 – 7 GPa.
- **Polyethylenové vlákno** - Hustota 0,97  $\text{kg}\cdot\text{dm}^3$ , mez pevnosti 3,5 GPa.
- **Uhlíkové nanotrubičky** – prvně vyrobeny v roce 1991. Hustota 0,116  $\text{kg}\cdot\text{dm}^3$ , pevnost v tahu 6,9 GPa. Teoretická pevnost až 130 GPa.



Polyethylenové vlákno



Uhlíkové nanotrubičky

# Jak zvýšit pevnostní vlastnosti ocelí

- **Zvýšit metalurgickou čistotu.**
- **Legováním** (zpevnění substituční a intersticiální).
- **Tvářecími operacemi** (deformačně-dislokačního zjemnění zrn a zvýšení počtu dislokací).
- **Termomechanickým zpracováním** (zjemnění zrna).
- **Tepelným zpracováním** (změna struktury, precipitace vhodných fází).

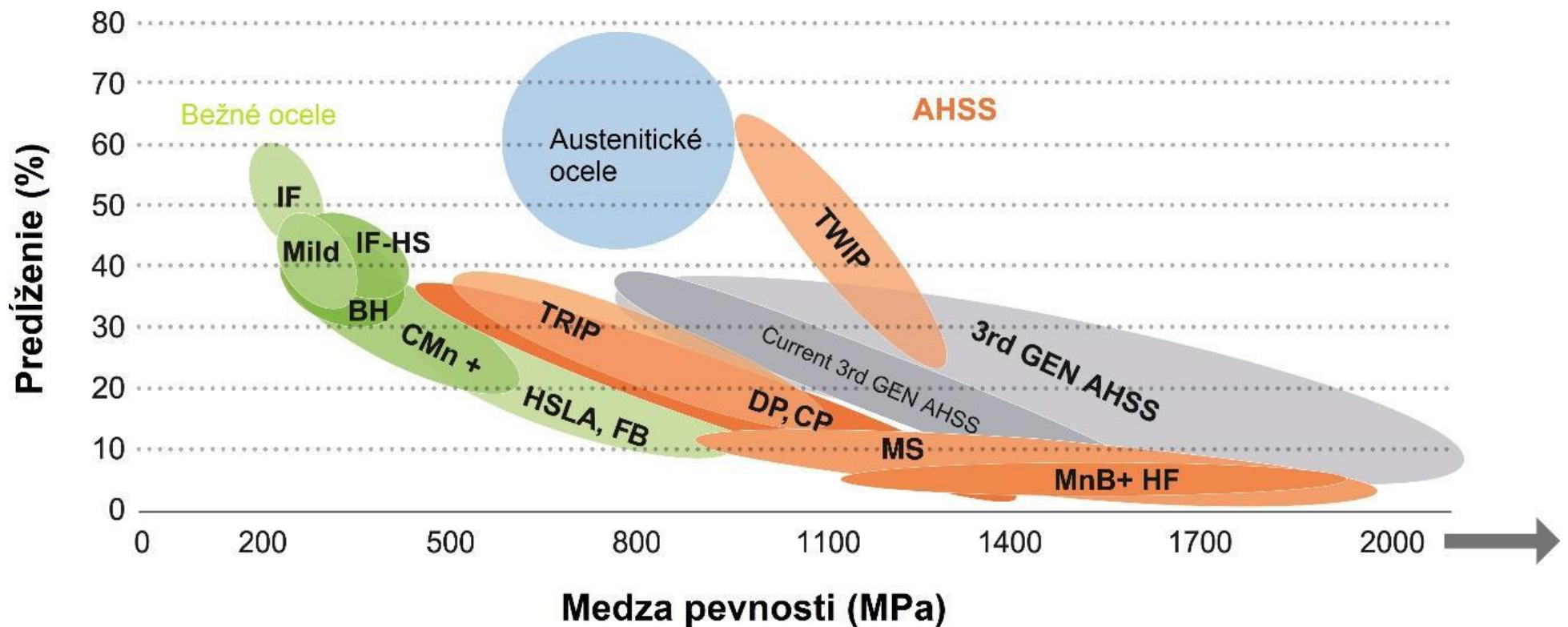
## Definice vysokopevnosti:

- Jako vysokopevné (vysokopevnostní) svařitelné oceli jsou podle konvence označovány **oceli s hodnotou meze kluzu vyšší než 460 MPa.**
- Podle ISO/TR 15608 jsou to oceli patřící do skupiny 2 a 3 (**jemnozrné termomechanicky zpracované, jemnozrné zušlechtěné, precipitačně vytvrzené**), se stanovenou mezí kluzu  $R_{eH} > 360$  MPa a také normalizované jemnozrné oceli s mezí kluzu  $R_{eH} > 360$  MPa patřící do skupiny 1.3.
- V souladu s potřebami automobilového průmyslu se za vysokopevnostní oceli HSS (high-strength steels) pokládají již oceli s mezí pevnosti  $R_m > 270$  MPa. Při podrobnějším dělení jsou jako **HSS** považovány **oceli s mezí kluzu do 550 MPa.** **Ocele s mezí kluzu v rozmezí od 550 MPa do 900 MPa** jsou nazývány **AHSS** (Advanced high-strength steel), tedy progresivní vysokopevné ocele. **Oceli s pevností v tahu nad 980 MPa** se nazývají **UHSS** (ultra-high-strength steels), teda ultra-vysokopevné ocele.

# Rozdělení vysokopevných ocelí podle mechanismu zpevnění

Dále budou popsány základní typy vysokopevných ocelí a procesy k dosažení zvýšených mechanických vlastností řízením výsledné struktury. Jsou vyráběny pomocí přesného řízení chemického složení, rychlostí ochlazování z oblasti austenitu, nebo kombinací ochlazování a řízeného válcování.

**IF** – Interstitial Free; **BH** – Bake Hardening; **CMn** – uhlík manganové; **HSLA** – High Strength Low Alloy; **FB** -Ferritic-Bainitic; **TRIP** - Transformation-Induced Plasticity; **TWIP** - Twinning-Induced Plasticity; **DC** – Dual Phase; **CP** - Complex Phase; **MS** – Martensitic; **MnB** – mangan bórové; **HF** – Hot Formed;



# Základní charakteristika vysokopevných ocelí

## HSS - High-Strength Steels – vysokopevné oceli

**Mild Steels** - oceli s nízkým obsahem uhlíku 0,05 až 0,25 %, mají ale nízké mechanické hodnoty.

**IF** (Interstitial Free steels) – vakuově odplyněné oceli s velmi nízkým obsahem intersticií, nízký obsah uhlíku 40 – 70 ppm a dusíku 30 – 50 ppm, později se ještě přidával Nb a/nebo Ti pro vazbu C a N.

**IF-HS** (Interstitial Free High Strength steels) – za studena válcované oceli žíhané oceli s precipitáty FeTiP

**BH** (Bake Hardening steels) – oceli, u kterých nastává zpevnění stárnutím během ohřevu například katoforézy (cca 20 min při 170 °C)

**CMn Steels** – uhlíkové a uhlík–manganové oceli

**HSLA** (High Strength Low Alloy steel) – vysokopevnostní nízkolegované oceli obsahující velmi malé množství uhlíku (méně než jedna desetina procenta) a jen malé množství legujících prvků. Jde o mikrolegované a termomechanicky zpracované oceli.

# Základní charakteristika vysokopevných ocelí

## AHSS - Advanced High-Strength Steels – progresivní vysokopevnostní oceli

**První generace AHSS** ocelí vychází ze základní feritické struktury a patří do ní **DP**, **FB**, **CP**, **MS**, **TRIP** a **HF** oceli.

**Druhá generace AHSS** jsou na bázi austenitu a zahrnují oceli typu **TWIP**.

**TRIP** (Transformation-Induced Plasticity steel) – ocel s převážně feritickou maticí obsahující zbytkový austenit, který se může v průběhu tváření transformovat na martenzit (TRIP efekt).

**DP** (Dual Phase steels) – mikrostruktura DP ocelí se skládá z měkké feritické matrice, ve které se vyskytují tvrdé martenzitické ostrůvky. Mohou být za tváření za tepla nebo za studena a mají BH efekt. Mohou také absorbovat velké množství deformační energie a na rozdíl od běžných ocelí se zpevňující efekt nesnižuje s rostoucí před deformací.

**FB** (Ferritic-Bainitic steel) - je také DP, s jemnější mikrostrukturou než mají klasické DP. Jsou legovány Al, B, Nb a/nebo Ti a mikrostruktura je tvořena feritickým základem, s ostrůvky bainitu. FB ocel funguje dobře za dynamických podmínek zatížení, používá se např. na profily, příčnický, výztuhy a kola.

**CP** (Complex Phase steel) – obsahují mikrostrukturu s maticí tvořenou feritem a bainitem, v níž jsou části martenzitu, zbytkového austenitu a perlitu. Zbrždění rekrytalizace se často používá, aby se vytvořila velmi jemná zrna. Mikrolegováním prvky, jako je titan nebo niob, může být také získáno precipitační zpevnění.



# Základní charakteristika vysokopevných ocelí

## AHSS - Advanced High-Strength Steels – progresivní vysokopevnostní oceli

**První generace AHSS** ocelí vychází ze základní feritické struktury a patří do ní **DP, FB, CP, MS, TRIP** a **HF** oceli.

**Druhá generace AHSS** jsou na bázi austenitu a zahrnují oceli typu **TWIP**.

**MS** (Martensitic steels) – u MS ocelí se při ochlazování téměř veškerý austenit převede na martenzit. Matrice obsahuje malé množství velmi jemného feritu nebo bainitu. Zvýšení pevnosti a tvrdosti je dosaženo zvýšením obsah uhlíku. Pečlivá kombinace Si, Cr, Mn, B, Ni, Mo a V zvyšuje prokalitelnost.

**HF** (Hot-Forming steels) – jsou oceli legované bórem, obsahují 0,002 – 0,005 % B a označují se také jako "bórová ocel." Při výrobě se používá přímá i nepřímá metoda. U přímé metody probíhá tváření při vysoké teplotě v austenitické oblasti v nástroji, ve kterém proběhne i transformace austenitu na martenzit. Při nepřímé metodě se výstřižek nejprve předlisuje, následně se založí do pece, po ohřevu v peci se provede dokončení tváření v nástroji a nakonec opět dojde k zakalení.

**TWIP** (Twinning-Induced Plasticity steels) – mají při pokojové teplotě plně austenitickou mikrostrukturu díky vysokému obsahu manganu (17 – 24%). Využívá princip deformace dvojčatěním. Tyto oceli kombinují velmi vysokou mez pevnosti s velmi vysokou tažností. Mez kluzu je maximálně 400 MPa a mez pevnosti v tahu je vyšší než 1000 MPa. Tažnost u této oceli je vysoká až 55%.

# Jemnozrnné oceli

- **U nelegovaných konstrukčních ocelí je zpevnění dosaženo zejména obsahem uhlíku a manganu.** Jedná se tedy především o zpevnění substituční a intersticiální.
- Zvýšení hodnoty meze kluzu a meze pevnosti lze dosáhnout také precipitačně, dolegováním dalších prvků, jako jsou Al, Ti, Nb, Zr a V. Potlačuje se tak nepříznivý vliv uhlíku na svařitelnost a zůstává zachovaná dobrá houževnatost.
- Dolegování uvedenými prvky a zejména jejich jemné precipitáty vyloučené na hranicích zrn, umožní vznik jemnozrnné struktury. Vazbou na C a N zajišťují uvedené prvky precipitační zpevnění materiálu a zároveň zpevnění hranicemi zrn. Takové **oceli se nazývají jemnozrnné.**
- Polotovary z jemnozrnných ocelí se nejčastěji vyrábějí řízeným válcováním v kombinaci s tepelným zpracováním. Vliv mikrolegur na mechanické vlastnosti oceli se tak ještě více zvýrazní. Obsahy mikrolegur jsou limitovány: Al min. 0,015 hm. %, Ti max. 0,15 %, V max. 0,2%, Nb max. 0,06%. Takové oceli se označují také jako **mikrolegované jemnozrnné.**
- **Shora uvedené prvky tvoří s uhlíkem a dusíkem karbidy, nitridy nebo karnonitridy – jedná se o AlN, TiC, Ti(C,N), TiN, NbC, Nb(C,N), V<sub>4</sub>C<sub>3</sub> a V(C,N).**

# Příznivý účinek precipitátů mikrolegujících prvků

- Precipitačním zpevněním se **zvyšuje mez kluzu a pevnosti**.
- Precipitáty o velikosti zhruba do 50 nm **brání migraci hranic zrn při rekrystalizaci** a tím brání zároveň **hrubnutí zrn**.
- Precipitáty zajišťují i částečnou vazbu intersticiálního dusíku. Vznik nitridů železa způsobujících stárnutí je tak minimální – **ocel nestárne**.
- Díky **mikrolegování** nemusí být v oceli tak **velké množství C**. To způsobuje snížení hodnoty uhlíkového ekvivalentu, **zlepšuje houževnatost a svařitelnost oceli**. Zároveň zjemnění zrna zvyšuje hodnotu meze kluzu.

Jemnozrnné oceli lze vyrobit různými způsoby. Velice často je využíváno **termomechanické zpracování (TMZ)**, dále **normalizační zpracování (válcování, žíhání) NZ** a také **zušlechťování Q**.

# Jemnozrnné oceli

- Precipitačním zpevněním se **zvyšuje mez kluzu a pevnosti**.
- Precipitáty o velikosti zhruba do 50 nm **brání migraci hranic zrn při rekrystalizaci** a tím brání zároveň **hrubnutí zrn**.
- Precipitáty zajišťují i částečnou vazbu intersticiálního dusíku. Vznik nitridů železa způsobujících stárnutí je tak minimální – **ocel nestárne**.
- Díky **mikrolegování** nemusí být v oceli tak **velké množství C**. To způsobuje snížení hodnoty uhlíkového ekvivalentu, **zlepšuje houževnatost a svařitelnost oceli**. Zároveň zjemnění zrna zvyšuje hodnotu meze kluzu.

Jemnozrnné oceli lze vyrobit různými způsoby. Velice často je využíváno **termomechanické zpracování (TMZ)**, dále **normalizační zpracování (válcování, žíhání) NZ** a také **zušlechťování Q**.

# Termomechanické zpracování

Je odlišné od tradičních tvářecích procesů, kdy je rozhodující dosažení konečného tvaru polotovaru – stanovení potřebných úběrů s ohledem na provozní možnosti.

*Termomechanické zpracování vyžaduje řízení a interakci více základních procesů:*

- **Rekrystalizace,**
- **růst zrna,**
- **fázové transformace,**
- **precipitace fází,**
- **hrubnutí částic,**
- **dislokační mechanismy (pohyb dislokací a hustota dislokací).**

**Oceli určené pro termomechanické zpracování** jsou jednak oceli prodávající fázové přeměny a také oceli, u kterých se využívá disperzní zpevnění, tedy vylučování precipitátů z přesyceného tuhého roztoku.

**Způsoby termomechanické zpracování:**

- ✓ **Tváření před přeměnou austenitu** může být nízkoteplotní a vysokoteplotní.
- ✓ **Tváření během přeměny austenitu – isoforming**
- ✓ **Tváření po přeměně austenitu** – může být tváření při nízkých teplotách a také deformační stárnutí.

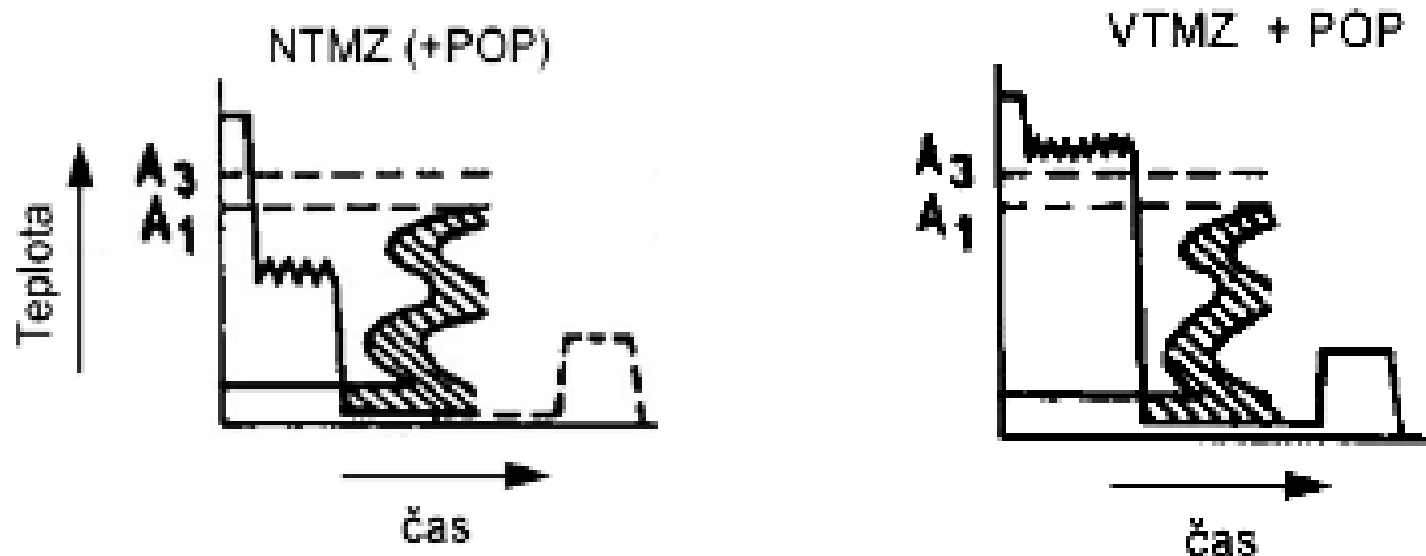
# Termomechanické zpracování

## Tváření před přeměnou austenitu - Nízkoteplotní termomechanické zpracování NTMZ

- Po austenitizaci se ocel rychle ochladí do oblasti stability metastabilního austenitu a probíhá tváření s vysokým stupněm deformace (nad 60%). Po tváření dojde k zakalení a zpravidla popuštění při nižší teplotě.
- Postup lze aplikovat u ocelí s výraznou oblastí stability přechlazeného austenitu (oceli legované Cr a Mo).

## Tváření před přeměnou austenitu - Vysokoteplotní termomechanické zpracování VTMZ

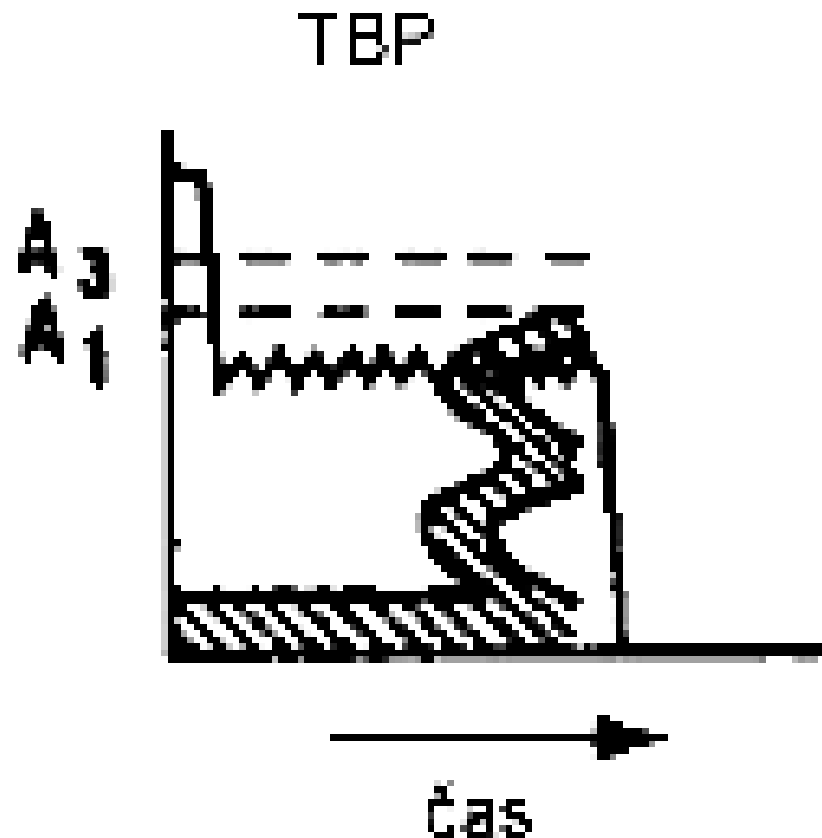
- Po austenitizaci se ocel tváří těsně nad teplotou  $A_{r3}$  a potom se provede zakalení a popuštění při nižších teplotách. Během deformace austenitu a následujícím kalení nesmí docházet k rekrytalizaci austenitu. Pro tento proces jsou vhodné oceli se zbrzděným průběhem rekrytalizace.
- Vysokoteplotní termomechanické zpracování zvyšuje plasticitu a odolnost při únavovém namáhání, zvýšení pevnosti je ve srovnání s NTMZ nižší.



# Termomechanické zpracování

## Tváření během přeměny austenitu – isoforming TBP

- Po austenitizaci se ocel rychle ochladí na teplotu tzv. perlitického nosu v diagramu IRA. Deformace probíhá během celé přeměny až do jejího ukončení a potom se materiál ochlazuje na vzduchu. Tvářecí teplota je obvykle v rozmezí 600 až 700 °C, dostačující pro průběh polygonizace.
- Strukturu charakterizuje vznik jemných subzrn feritu a jemných globulárních karbidů. Velikost deformace je větší než 60%. Isoforming především zvyšuje houževnatost a snižuje tranzitní teplotu.



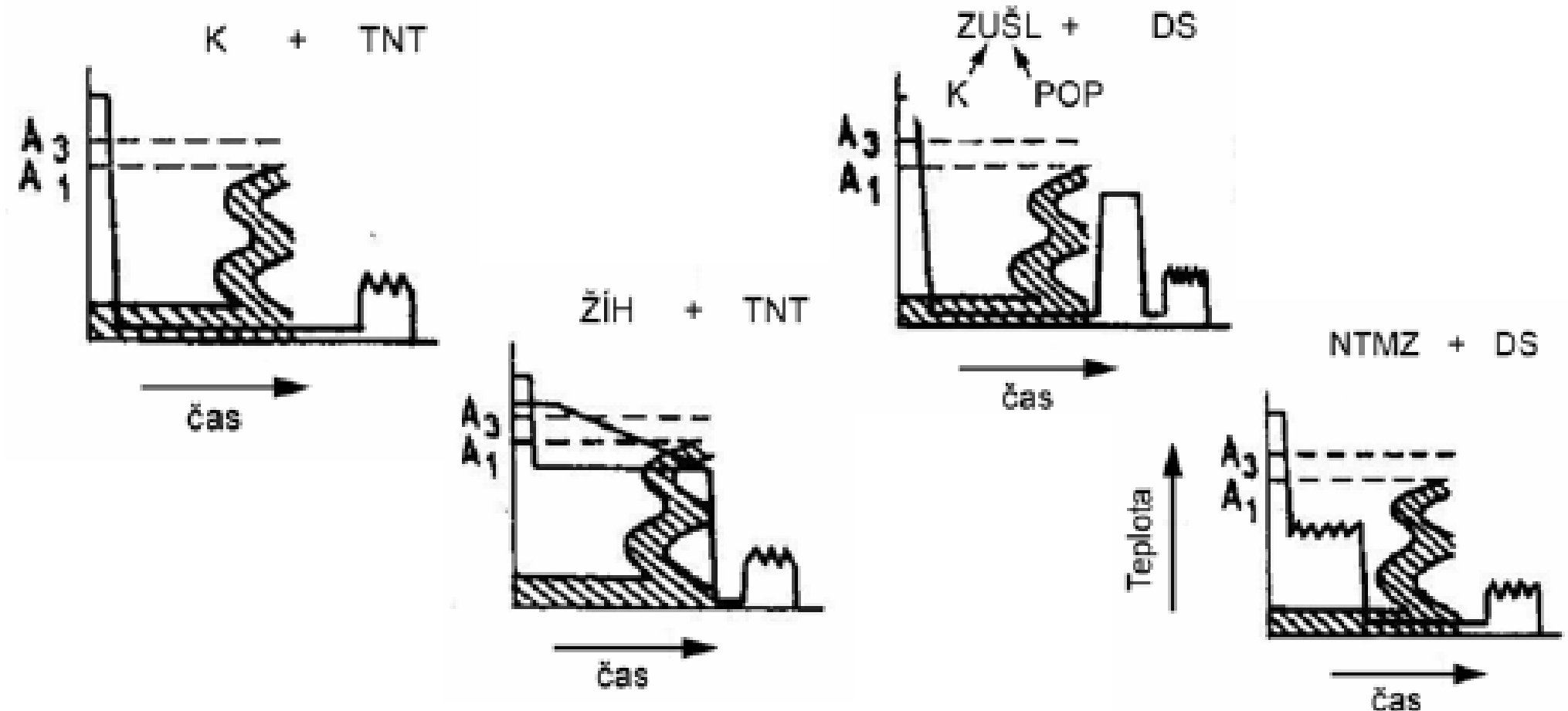
# Termomechanické zpracování

## Tváření po přeměně austenitu – Tváření při nízkých teplotách TNT

- Pro tváření při nízkých teplotách se používá ocel ve stavu po kalení nebo po žihání. Deformací oceli po kalení se dosahuje pevnosti až přes 3000 MPa.

## Tváření před přeměnou austenitu – Deformační stárnutí DS

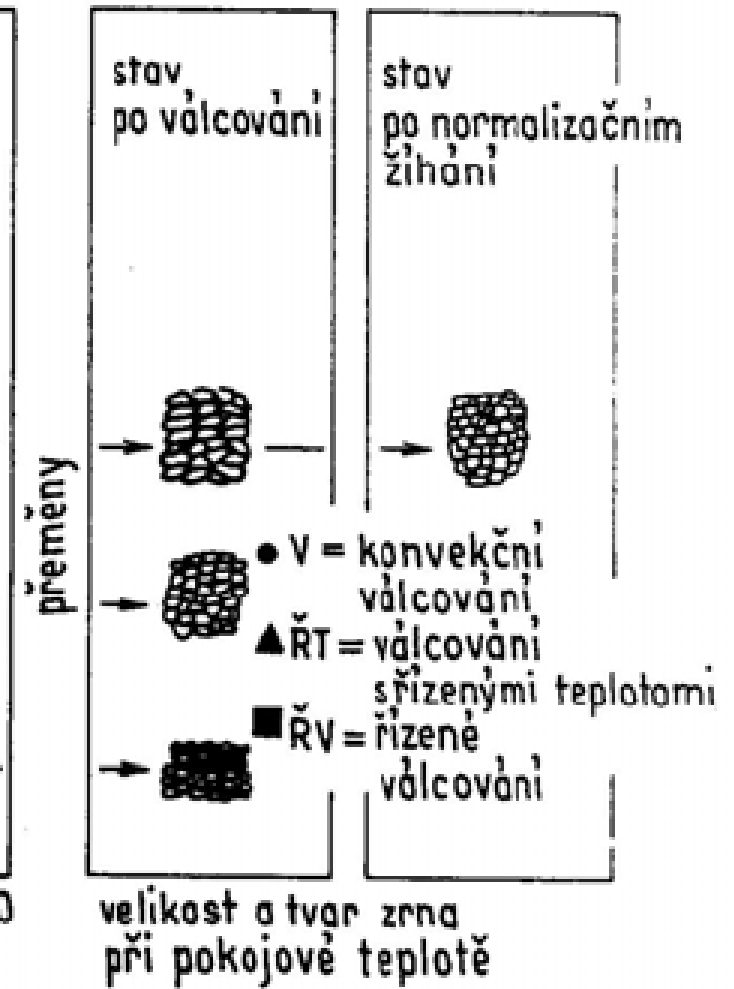
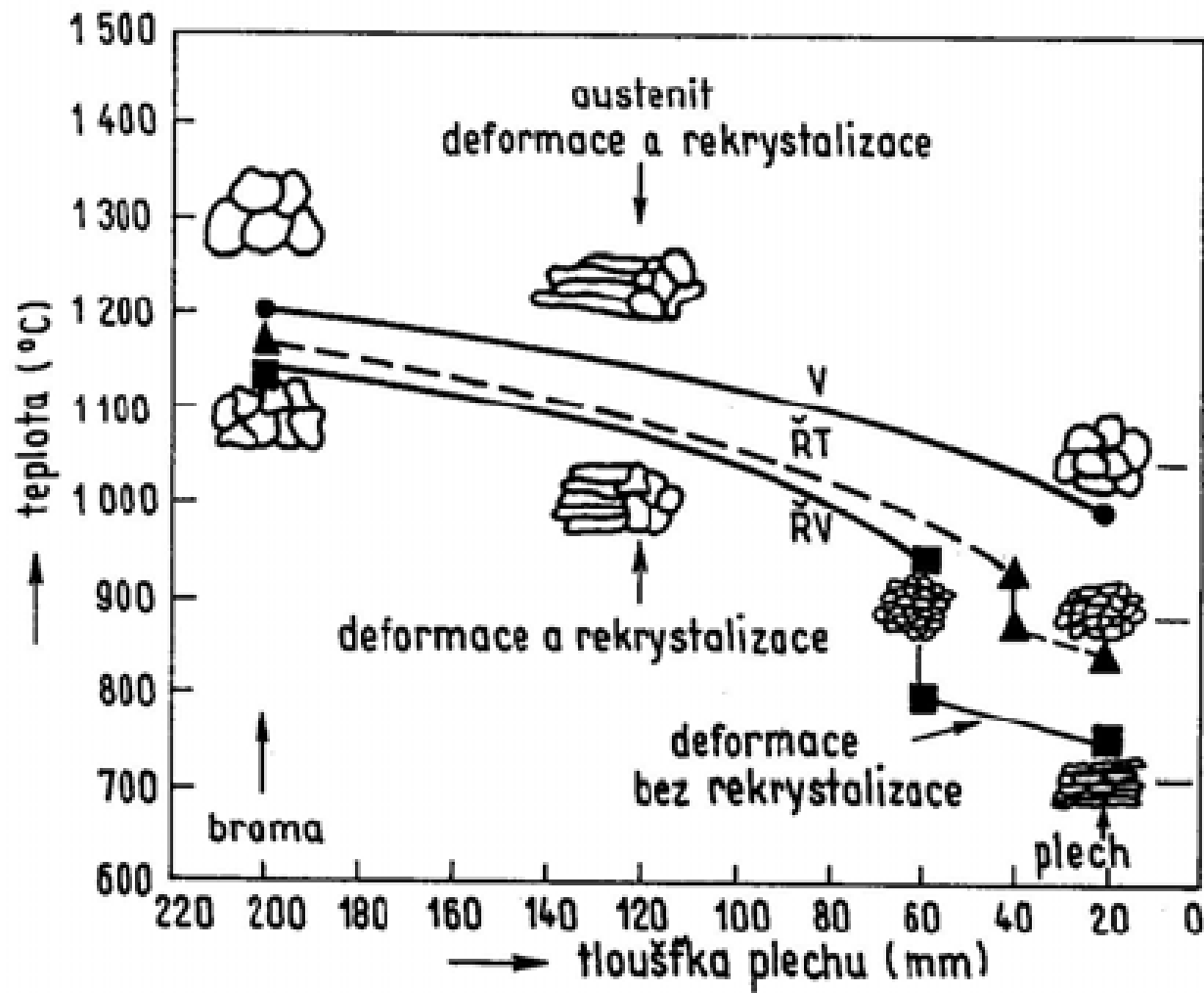
- Postup se aplikuje u konvenčně zušlechtěné oceli nebo u oceli po NTMZ. Tváření probíhá malou deformací 2% při teplotě 150 až 200 °C, při které probíhá stárnutí. Zvýší se pevnost ale sníží plasticita a vrubová houževnatost.





# Řízené válcování

## Schéma postupů válcování



# Řízené válcování

Při řízeném válcování je vývoj struktury realizován ve třech základních teplotních oblastech: **I. oblast rekrystalizace**, **II. oblast bez rekrystalizace**, **III. oblast austeniticko-feritická**

**I. Oblast** – velikost zrna je závislá na teplotě a metalurgickém charakteru oceli. Zjemnění zrna je dáno cyklem deformace - rekrystalizace. Zárodky pro transformaci  $\gamma \rightarrow \alpha$  se tvoří pouze na hranicích austenitických zrn. Výsledná velikost zrna dosahuje postupně mezní hodnoty a dalším cyklem deformace – rekrystalizace se zrno již dále nezmenšuje. Po transformaci vzniká poměrně hrubé feritické zrno.

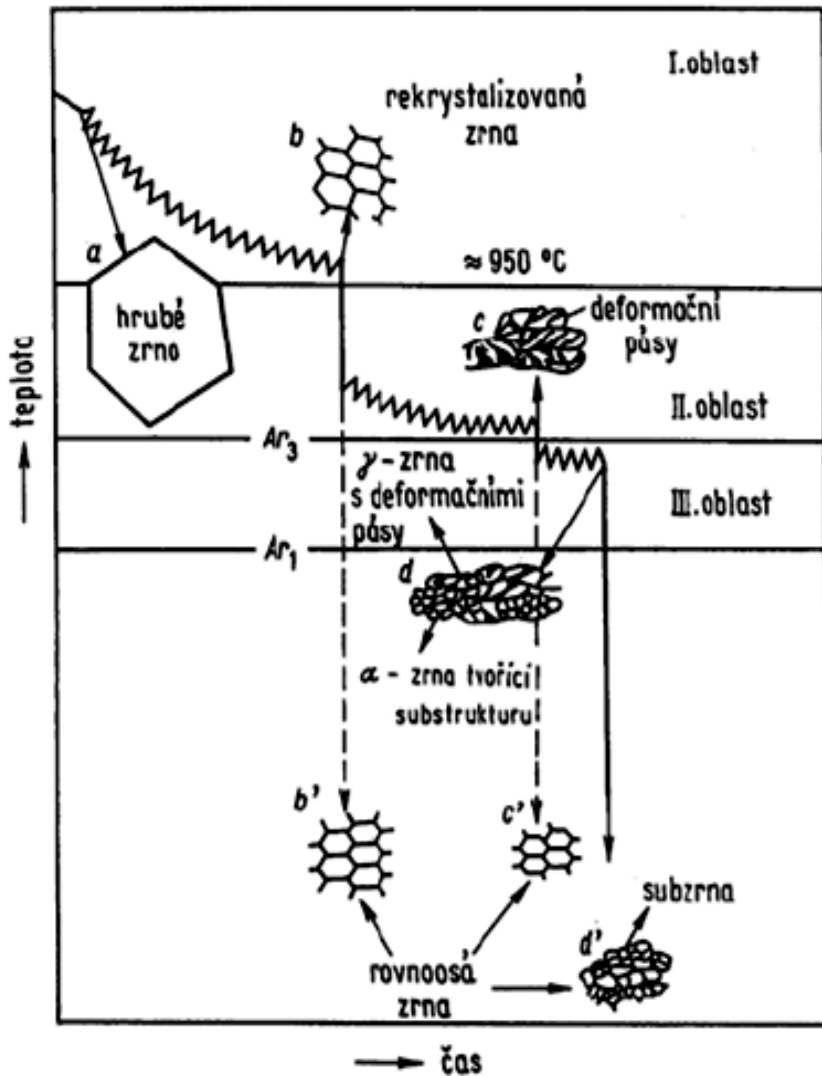
**Účinný vliv na velikost zrna má deformace do hodnoty  $\epsilon = 0,4$  až  $0,5$ .**

**II. Oblast** – další zjemnění zrna získaného v I. oblasti umožňuje tváření v II. oblasti. Vlivem zbrzděné rekrystalizace se zrna austenitu prodlužují a vznikají pásy s vyšší hustotou dislokací, větší vnitřní energií a nestabilitou. Při transformaci  $\gamma \rightarrow \alpha$  se zárodky feritu tvoří na hranici austenitových zrn i v deformačních pásmech. Celkově vyšší počet nukleačních zárodků má za následek výrazně jemnější feritické zrno.

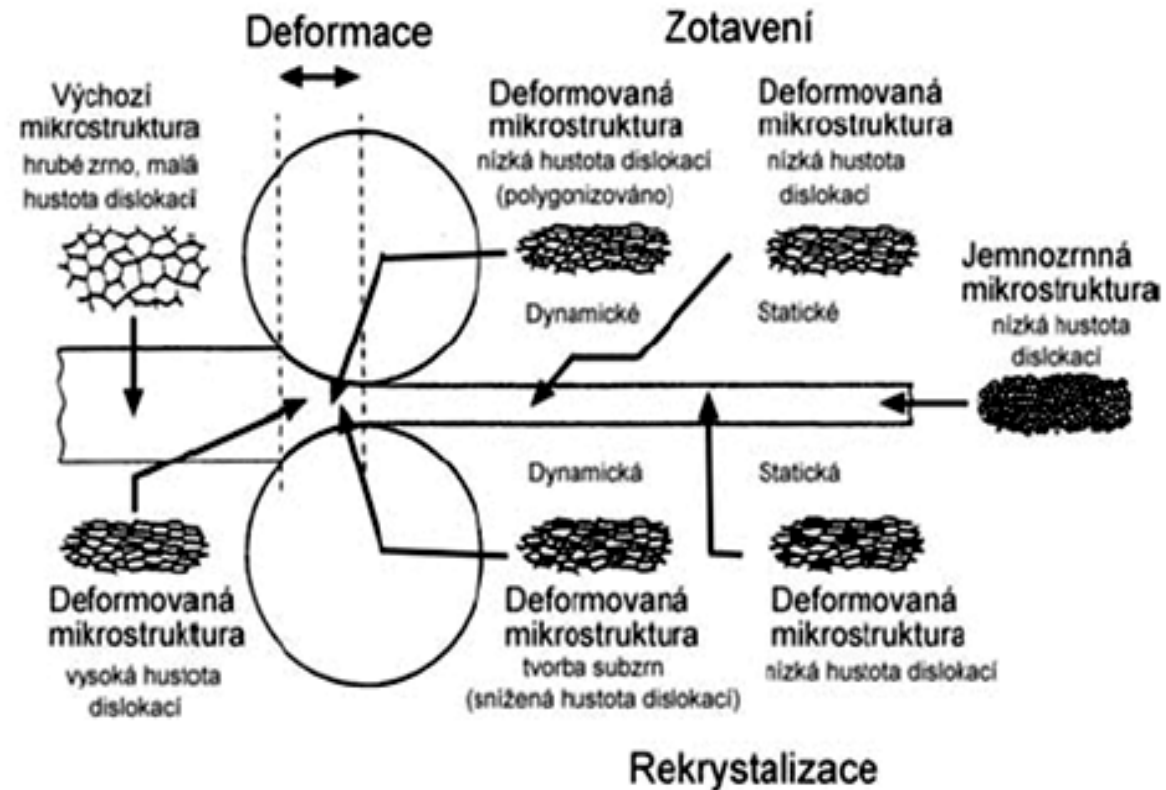
**III. Oblast** – další zjemnění zrna lze dosáhnout tvářením ve III. oblasti teplot (dvoufázové). Feritické zrno deformované po přeměně  $\gamma \rightarrow \alpha$  již nemůže rekrystalizovat a při probíhající zotavení vznikají subzrna. Snížená rozpustnost Mn a V ve feritu po transformaci  $\gamma \rightarrow \alpha$  urychluje precipitaci podporovanou deformací, což přispívá ke znehybnění dislokací a subhranic. Ve dvoufázové oblasti je potlačen také růst zrn. Výsledkem tváření v této oblasti je smíšená struktura obsahující rovnoosá zrna feritu nedeformovaná po transformaci  $\gamma \rightarrow \alpha$  s menší hustotou dislokací („měkká“) a subzrna s větší hustotou dislokací („tvrdá“).

# Řízené válcování

Při řízeném válcování je vývoj struktury realizován ve třech základních teplotních oblastech: **I. oblast** rekrystalizace, **II. oblast** bez rekrystalizace, **III. oblast** austeniticko-feritická



(a)



(b)

# Faktory ovlivňující mez kluzu a tranzientní teplotu

- Zpevňující účinek substitučních a interstitičních prvků;
- Velikost feritického zrna;
- Precipitáty ve feritu;
- Obsah perlitu a mezilamelární vzdálenost jeho fází;
- Peierlsovo-Nabarrovo napětí – napětí potřebné k uvedení dislokace do pohybu (přibližně 40 MPa).

$$R_e = \sigma_0 + kd^{-1/2} \quad \text{Hall – Petchův vztah}$$

$R_e$  – mez kluzu

$\sigma_0$  – napětí potřebné pro překonání Peierls-Nabarrova třecího napětí, odporu rozpuštěných cizích atomů, odporu precipitátů z tuhého roztoku a defektů mřížky

$k$  – konstanta, jejím měřítkem je hodnota smykového napětí potřebného pro uvolnění nahromaděných dislokací

$d$  – rozměr zrna

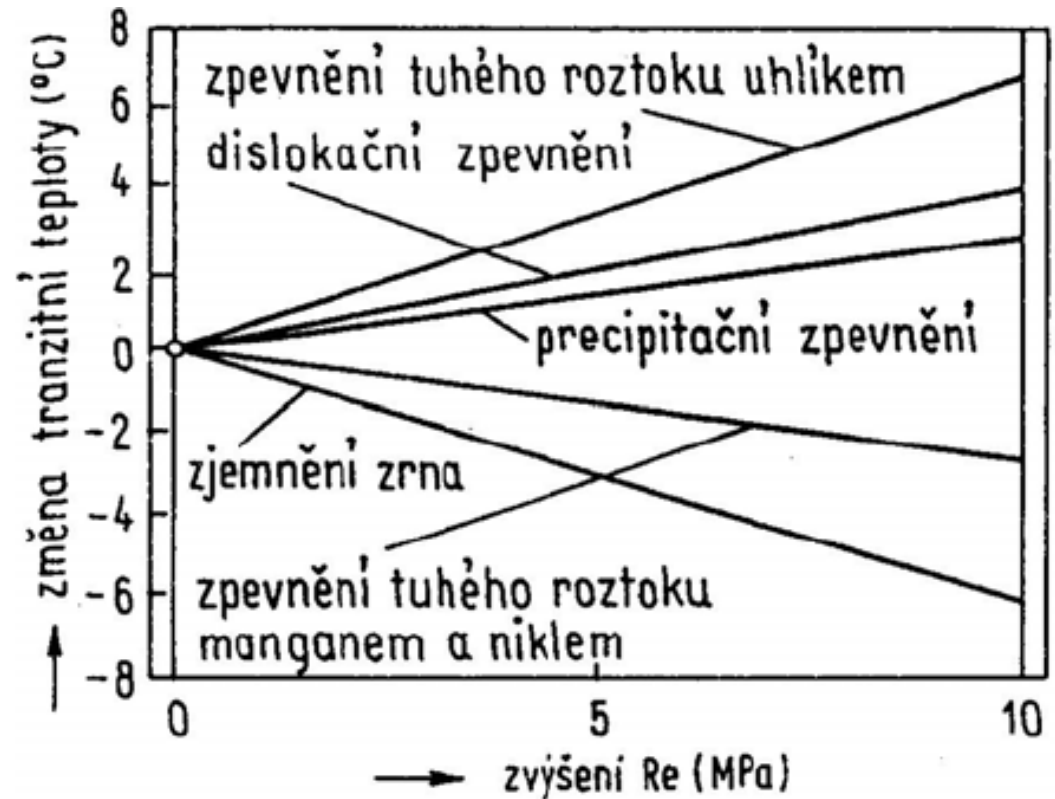
Pro běžné konstrukční oceli je  $\sigma_0 = 10$  až  $200$  MPa,  $k = 6$  až  $30$  MPa.m<sup>0,5</sup>

# Vliv dílčích faktorů na hodnotu tranzientní teploty

- ✓ Chemické složení oceli (vyjadřuje konstanta K),
- ✓ zkřehnutí způsobené precipitací -  $\Delta T_{PR}$ ,
- ✓ zkřehnutí způsobené přidavky substitučních prvků -  $\Delta T_S$ ,
- ✓ zkřehnutí způsobené přidavkem intersticiálních prvků -  $\Delta T_{IN}$ ,
- ✓ velikost zrna -  $\Delta T_Z$ .

$$T_{TR} = K + \Delta T_{PR} + \Delta T_S + \Delta T_{IN} + \Delta T_Z$$

Pouze přidavek Mn, Ni a zjemnění zrna současně zvyšují mez kluzu a snižují tranzitní teplotu!!!



*Vliv dílčích faktorů na mez kluzu a tranzitní teplotu*

# HSLA oceli – High Strength Low Alloy steels

Jsou to vysokopevnostní nízkolegované oceli, obsahující velmi malé množství uhlíku (zpravidla  $C \leq 0,1$  hm.%) a jen malé množství legujících prvků. Jedná se o oceli mikrolegované a termomechanicky zpracované.

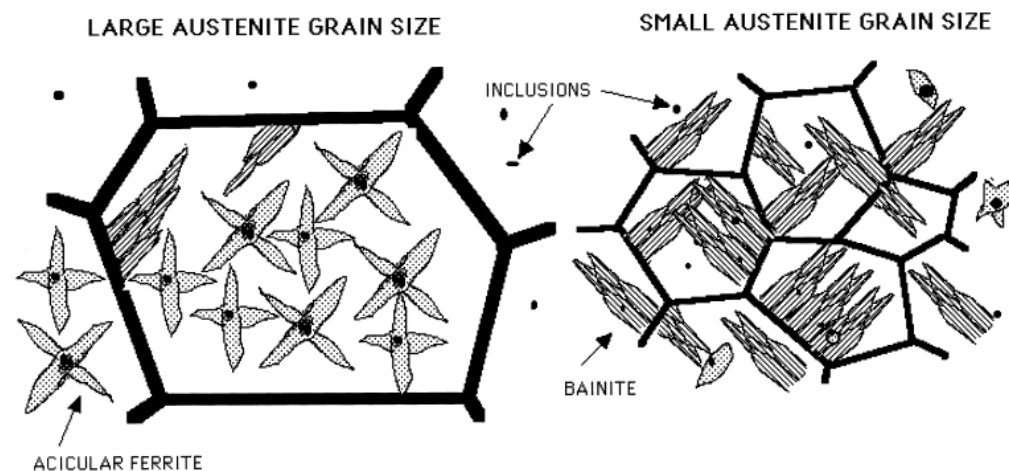
- Původně byly vyvíjené jako ocele na výrobu ropovodů a plynovodů, odolávající atmosférické korozi a se zvýšenými mechanickými vlastnostmi. Až později se prosadili v automotive, ale i tam to byla první široce využívaná skupina HSS ocelí.
- Jemnozrnná struktura může být různorodá, **feriticko-perlitická**, s **acikulárním feritem** (spodní bainit), nebo **feriticko-martenzitická**. V matici jsou jemně rozptýlené karbidy legujících prvků.
- Nízký obsah uhlíku zajišťuje dobrou tvářitelnost a svařitelnost. **Obsah legujících prvků je minimální**. Prvky jako Cu, Ti, V a Nb zvyšují pevnost precipitačně a zpevněním tuhého roztoku. Malá množství Zr, Ca a kovů vzácných zemin regulují tvar oxidů síry, což přispívá k lepší tvářitelnosti. Konečné vlastnosti mohou být získány po tepelném zpracování.
- Mez kluzu  $R_e$  se pohybuje v intervalu **240 až 690 MPa** a mez pevnosti  $R_m$  je v rozmezí **290 až 800 MPa**. V porovnání s běžnými uhlíkovými oceli mají **o 20 – 30 % nižší hmotnost při stejné pevnosti**.
- Používají se na staticky i dynamicky namáhané konstrukce jako jsou mosty, jeřáby, části vlaků, podvozkové části aut, výztuže dveří, nárazníků i nosných částí karosérií.

# Dle ASTM lze HSLA oceli rozdělit do 6 skupin

- **Ocelí odolávající atmosférické korozi** – obsahují menší množství prvků jako je Cu a P zaručující zvýšení odolnosti proti korozi a substitučního zpevnění feritu.
- **Mikrolegované ferriticko-perlitické oceli** – obsahují velmi malé množství silně karbidotvorných prvků jako jsou Nb, V a/nebo Ti pro precipitační zpevnění, zjemnění zrna a ovlivnění transformačních teplot.
- **Válcované perlitické oceli** – mohou zahrnovat i uhlík-manganové oceli. Mohou mít i malé množství jiných prvků na zvýšení pevnosti, houževnatosti, tvářitelnosti a svařitelnosti.
- **Nízkolegované oceli se strukturou acikulárního feritu** (spodního bainitu) – mají nízký obsah uhlíku (méně než 0,05 %) s výjimečnou kombinací vysoké meze kluzu (690 MPa) svařitelnosti, tvářitelnosti a dobré houževnatosti.
- **Dvoufázové oceli s martenzitickými oblastmi ve ferrické matici** – mají dobrou kombinaci tažnosti a vysoké pevnosti v tahu.
- **Oceli s řízeným tvarem inkluzí** – mají zlepšenou tažnost a houževnatost v příčném směru. Obsahují malý přídavek Ca, Zr nebo Ti případně prvky vzácných zemin. Sulfidové inkluze mají téměř globulární charakter a jsou rovnoměrně rozptýlené.

# Acikulární ferit

- Při bainitické přeměně je rychlost difúze C v austenitu značně omezena, a proto jeho difúze nemůže proběhnout dokonale. Proto bude mít ferit oproti svému rovnovážnému stavu několikanásobně větší obsah C. Takový **přesycený ferit** se nazývá **acikulární (bainitický) ferit** a vyznačuje se zvýšenou hustotou dislokací ovlivňující jak pevnost, tak také houževnatost.
- Jehlicovité útvary feritu se vytvářejí ve vnitřním prostoru původních austenitických zrn **při přímé nukleaci na inkluzích nebo precipitátech**, což má za následek náhodně orientované krátké feritové jehlice.
- Jehlicovité útvary feritu se také vyznačují vysokým úhlem hranic mezi zrny feritu. Tím tvoří efektivní překážku pro šíření štěpných trhlin. Materiál tak má dobrou houževnatost a mikrostruktura je výhodnější, protože chaotické uspořádání acikulárního feritu zvyšuje tuhost.
- Při vyšších transformačních teplotách precipituje uhlík na hranicích feritických zrn, kde tvoří s Fe hrubé karbidy  $Fe_3C$ .
- Při nižších transformačních teplotách precipitace karbidů probíhá přednostně uvnitř desek feritu na speciálních nekovových precipitátech nebo vměstcích. Protože teplota přeměny je už relativně nízká, je bainitický ferit velmi jemný a svými vlastnostmi se blíží vlastnostem martenzitu.





**Děkuji Vám za pozornost.**